



IX congresso ibérico de
AGROENGENHARIA 2017

4 a 6 de setembro
Bragança – Portugal

A irradiação como tecnologia pós-colheita viável para conservação de cogumelos, vegetais e plantas aromáticas

José Pinela^{1,2}, Filipa Reis¹, Eliana Pereira^{1,2}, Ângela Fernandes^{1,2}, M. Beatriz P.P. Oliveira²,
Amílcar L. Antonio¹, Sandra Cabo Verde³, Isabel C.F.R. Ferreira¹

¹ Centro de Investigação de Montanha (CIMO), ESA, Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal. iferreira@ipb.pt

² REQUIMTE/LAQV, Faculdade de Farmácia, Universidade do Porto, Rua Jorge Viterbo Ferreira, nº 228, 4050-313 Porto, Portugal.

³ Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN), IST, Universidade de Lisboa, E.N. 10, 2695-066 Bobadela, Portugal.

Resumo

A irradiação é um tratamento pós-colheita utilizado para processar produtos destinados à indústria alimentar e farmacêutica. Esta tecnologia é frequentemente combinada com outros processos de conservação, tais como a secagem e o embalamento, para tirar partido de possíveis efeitos sinérgicos. De facto, a elevada perecibilidade de alguns alimentos e matérias-primas torna imprescindível aplicar tratamentos de conservação capazes de aumentar o tempo de vida útil, mas com um impacto mínimo em atributos de qualidade. Este estudo pretendeu avaliar a adequabilidade da irradiação para conservar parâmetros nutricionais de cogumelos, vegetais e plantas aromáticas durante o tempo de vida útil. O cogumelo e as plantas aromáticas foram irradiados com feixe de eletrões a uma dose máxima 10 kGy e analisadas após irradiação e passados 6 e 12 meses ou 12 e 18 meses, respetivamente. Os vegetais frescos foram irradiados numa câmara experimental de ⁶⁰Co a uma dose máxima de 6 kGy. Estes foram analisados antes de irradiar e após 7 ou 14 dias de armazenamento a 4 °C. O tratamento de irradiação permitiu manter mais eficazmente o perfil nutricional do cogumelo e dos vegetais durante o armazenamento, comparativamente com amostras não irradiadas. Além disso, o tempo de armazenamento teve um maior impacto no perfil nutricional do cogumelo do que a irradiação (com exceção dos ácidos gordos). No caso das plantas aromáticas, apesar de a irradiação ter atenuado perdas de qualidade durante o armazenamento, não foi possível identificar uma tendência geral pois os fatores testados tiveram efeitos dissimilares nas diferentes espécies.

Palavras-chave: tecnologia pós-colheita, feixe de eletrões, radiação gama, composição nutricional, qualidade alimentar

Irradiation as a feasible post-harvest technology for preservation of mushrooms, vegetables and aromatic plants

Abstract

Irradiation is a post-harvest treatment used to process products for the food and pharmaceutical industries. This technology is often combined with other preservation factors, such as drying and packaging, to take advantage of possible synergistic effects. In fact, the high perishability of some foods and raw materials makes imperative to apply preservation treatments capable of extending shelf-life but with minimal impact on quality attributes. This study aimed to evaluate the suitability of irradiation for preserving nutritional parameters of

mushrooms, vegetables and aromatic plants during shelf-life. The mushroom and aromatic plants were electron beam irradiated at a maximum dose of 10 kGy and analyzed after irradiation and after 6 and 12 months or 12 and 18 months, respectively. The fresh vegetables were irradiated in a ^{60}Co experimental chamber at a maximum dose of 6 kGy. These were analyzed before irradiating and after 7 or 14 days of storage at 4 °C. The irradiation treatment allowed maintaining more efficiently the nutritional profile of the mushroom and vegetables during storage, as compared to non-irradiated samples. In addition, the storage time had a greater impact on the nutritional profile of the mushroom than irradiation (with the exception of fatty acids). In the case of aromatic plants, although the irradiation attenuated quality losses during storage, it was not possible to identify a general trend since the tested factors had dissimilar effects in the different species.

Keywords: post-harvest technology, electron beam, gamma radiation, nutritional composition, food quality

1. Introdução

O processo de irradiação é um tratamento pós-colheita que consiste na exposição de alimentos embalados ou a granel a uma dose controlada de radiação ionizante. É utilizada para desinfestar e sanitizar diferentes produtos, incluindo cogumelos, vegetais e plantas aromáticas, e também para retardar processos de maturação e senescência (ICGFI 1999). Trata-se de uma alternativa sustentável face aos agentes químicos vulgarmente utilizados, não deixa resíduos no alimento e na União Europeia encontra-se regulamentada para vários produtos alimentares (Directiva 1999/3/CE).

Os cogumelos, os vegetais e as plantas aromáticas são alimentos/matérias-primas altamente perecíveis, sendo necessário submetê-los a tratamentos pós-colheita que estendam o seu tempo de vida útil e garantam a sua qualidade e segurança. Estes produtos são propensos à presença de insetos, microrganismos e parasitas, os quais aceleram os processos de degradação e representam uma ameaça para a saúde pública. A irradiação ionizante tem sido apontada como uma tecnologia de conservação eficaz e sustentável (Lacroix e Ouattara, 2000; Pinela e Ferreira, 2017), mas torna-se necessário saber qual a dose mais indicada para cada produto alimentar e matéria-prima de forma a não afetar negativamente as suas propriedades nutricionais e composição química.

O tratamento de irradiação é geralmente combinado com outros processos de conservação, tais como a secagem (remoção da atividade da água) e o embalamento (prevenção de contaminações pós irradiação), o que permite aumentar consideravelmente o tempo de prateleira. O processo de secagem permite superar problemas relacionados com a superprodução de alimentos e tempos de vida útil limitados. De facto, os produtos secos, nomeadamente os cogumelos desidratados e embalados podem ter uma vida útil superior a um ano (Walde et al., 2006). No entanto, a secagem provoca alterações indesejáveis no produto tais como perda de nutrientes, ocorrência de reações enzimáticas e fenómenos de oxidação de lípidos e vitaminas (Celestino, 2010). Além disso, a flora dominante de bactérias e fungos tem a capacidade de sobreviver por longos períodos de tempo nos alimentos desidratados caso não sejam submetidos a tratamentos de desinfecção (Almeida, 2006). O uso de matérias-primas de qualidade microbiológica é também um requisito imprescindível no setor dos frutos e vegetais embalados prontos a consumir (Pinela e Ferreira, 2017) e na indústria farmacêutica (Haleem et al., 2014; Ibrahim et al., 2014).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto do tratamento de radiação ionizante (radiação gama e/ou feixe de eletrões) sobre a composição nutricional e teores em açúcares e tocoferóis de diferentes produtos agrícolas, nomeadamente cogumelos, vegetais frescos e plantas aromáticas.

2. Material e Métodos

Amostras: Exemplares silvestres de *Macrolepiota procera* (Scop.) Singer (cogumelo frade), *Nasturtium officinale* R. Br. (agrião) e *Rumex induratus* Boiss. & Reut (azedas) foram colhidos na região de Bragança, Portugal. As plantas aromáticas *Aloysia citrodora* P. (lúcia-lima), *Melissa*

officinalis L. (erva-cidreira), *Melittis melissophyllum* L. (betónia-bastarda) e *Mentha piperita* L. (hortelã-pimenta) foram fornecidas pela empresa Pragmático Aroma Lda. de Alfândega da Fé, Portugal, sob a forma desidratada.

Processamento das amostras: As amostras de *M. procera* foram desidratadas numa estufa a 30 °C e seguidamente irradiadas com feixe de eletrões a 0,5, 1 e 6 kGy. A análise foi realizada após irradiação e passados 6 e 12 meses de armazenamento. As amostras secas de *A. citrodora*, *M. officinalis*, *M. melissophyllum* e *M. piperita* foram reduzidas a pó e irradiadas a 10 kGy com feixe de eletrões. A análise foi realizada após irradiação e passados 12 e 18 meses de armazenamento. O processo de irradiação com feixe de eletrões foi realizado no Instituto Nuclear de Química e Tecnologia (INCT) em Varsóvia, Polónia. Os exemplares de *N. officinale* e *R. induratus* foram lavados em água corrente e uma porção prontamente analisada (controlo não armazenado). O restante material fresco foi embalado em sacos esterilizados de polietileno e seguidamente irradiado a 1, 2 e 5 ou 6 kGy (doses de radiação gama estimadas), respetivamente, numa câmara experimental de ⁶⁰Co situada no Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN) em Lisboa, Portugal. As amostras foram armazenadas a 4 °C durante 7 e 12 dias (para *N. officinale* e *R. induratus*, respetivamente) e finalmente analisadas. Um grupo controlo não irradiado (0 kGy) seguiu todos os ensaios realizados.

Avaliação da composição nutricional: Os teores de água, proteínas, lípidos e cinzas foram determinados seguindo os procedimentos das normas AOAC (AOAC, 2016). O teor de glúcidos foi estimado por diferença utilizando a Equação (1) e a energia foi calculada utilizando a Equação (2).

$$\text{Glúcidos (g)} = 100 - (\text{g água} + \text{g proteínas} + \text{g lípidos} + \text{g cinzas}) \quad (1)$$

$$\text{Energia (kcal)} = 4 \times (\text{g proteínas}) + 4 \times (\text{g glúcidos}) + 9 \times (\text{g lípidos}) \quad (2)$$

Análise de compostos individuais: Açúcares, tocoferóis e ácidos gordos foram determinados seguindo os procedimentos descritos por Fernandes et al. (2014), Pereira et al. (2015) e Pinela et al. (2016a,b). A análise de açúcares e tocoferóis foi realizada num sistema de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) acoplado a um detetor de índice de refração ou de fluorescência, respetivamente. Estes foram identificados por comparação cromatográfica com padrões comerciais e quantificados através do método do padrão interno (PI, melezitose e tocol, respetivamente). A análise dos ácidos gordos foi realizada num sistema de cromatografia gasosa acoplado a um detetor de ionização de chama (GC-FID). Estes foram identificados por comparação dos tempos de retenção relativos dos picos FAME (ésteres metílicos de ácidos gordos) das amostras com padrões comerciais e expressos em percentagem relativa de cada ácido gordo.

Análise estatística: Os dados foram tratados utilizando o *software* SPSS, versão 22.0 (SPSS Inc). As diferenças induzidas pela irradiação nos parâmetros nutricionais dos vegetais frescos foram avaliadas usando uma análise de variância a um fator (ANOVA). O cumprimento dos requisitos da ANOVA foi testado por meio dos testes de Shapiro-Wilk's e Levene. Para as amostras de *M. procera* e plantas aromáticas, foi realizada uma ANOVA com soma de quadrados tipo III utilizando o procedimento do modelo linear geral (GLM). As variáveis dependentes foram analisadas por ANOVA bidirecional, considerando os fatores FE (dose de feixe de eletrões) e TA (tempo de armazenamento). A interação (FE×TA) também foi avaliada; quando significativa, as diferenças foram analisadas a partir das parcelas de médias marginais estimadas e, quando não estatisticamente significativa ($p > 0,05$), os meios pertencentes a cada fator foram comparados pelo teste t-student.

3. Resultados e Discussão

3.1. Efeito na composição de *M. procera*

Os resultados da composição nutricional, energia e conteúdo em açúcares das amostras secas de *M. procera* submetidas a diferentes doses de irradiação (0,5, 1 e 6 kGy) e tempos de armazenamento (0, 6 e 12 meses) são apresentados na Tabela 1. Os teores de proteínas, lípidos e cinzas apresentaram uma tendência a decrescer com o tempo de armazenamento, fenômeno que afetou o teor de glúcidos, macronutrientes que aumentaram ao longo do tempo. Por outro lado, o tratamento de irradiação não causou alterações significativas, com exceção do menor valor proteico nas amostras irradiadas com a dose de 0,5 kGy. Relativamente aos açúcares, a trealose (≈ 9 g/100 g massa seca) e o manitol (≈ 5 g/100 g massa seca) foram os açúcares predominantes, sendo a frutose e a melezitose encontradas em menor quantidade nas amostras não armazenadas. A irradiação aplicada não provocou alterações particulares, com exceção dos maiores teores de frutose em amostras irradiadas a 0,5 kGy; por outro lado, a trealose e o manitol foram detetados em maior quantidade nas amostras não armazenadas.

A Tabela 2 apresenta os efeitos da irradiação e do tempo de armazenamento nos teores de tocoferóis e ácidos gordos das amostras secas de *M. procera*. δ -Tocoferol foi a isoforma encontrada em maior quantidade (≈ 60 μ g/100 g massa seca). β -tocoferol e γ -tocoferol foram também detetados em quantidades significativas, sendo o δ -tocoferol relativamente estável com o tempo de armazenamento e com as doses aplicadas. As isoformas β - e γ - foram detetados apenas nas amostras não armazenadas. No que se refere aos ácidos gordos, na espécie *M. procera* foram quantificados 25 ácidos gordos individuais, sendo o ácido linoleico ($\approx 60\%$), o palmítico ($\approx 25\%$) e o oleico ($\approx 9\%$) os maioritários. Estes compostos lipofílicos sofreram alterações significativas tanto com as doses aplicadas como com o tempo de armazenamento (Tabela 2).

3.2. Efeito na composição das plantas aromáticas

Os resultados da composição nutricional, energia e teor em açúcares das amostras secas de *A. citrodora*, *M. officinalis*, *M. melissophyllum* e *M. piperita* em função da dose de irradiação (0 e 10 kGy) e do tempo de armazenamento (0, 12 e 18 meses) são apresentados na Tabela 3. Estes são apresentados em percentagem diferencial em relação aos valores do controlo publicados por Pereira et al. (2015). Os teores de gordura (especialmente em *A. citrodora* e *M. piperita*) e de cinzas tenderam a diminuir ao longo do tempo de armazenamento. De um modo geral, a sacarose destacou-se como sendo o açúcar presente em maior quantidade na amostra controlo (0,9 a 7,1 g/100 g massa seca), verificando-se uma diminuição estatisticamente significativa após 18 meses para a glucose (em *A. citrodora* e *M. piperita*), a sacarose, a trealose e os açúcares totais (em *M. piperita*).

O conteúdo em tocoferóis sofreu uma acentuada diminuição ao longo do tempo de armazenamento (Tabela 4), o qual foi significativamente maior após 18 meses (exceto para β -tocoferol), quando comparado com os resultados obtidos após 12 meses. O tratamento com feixe de elétrons não evitou essas reduções significativas na maioria das ocasiões, mas teve um efeito positivo nos teores de α -tocoferol (em *M. officinalis*), β -tocoferol (em *A. citrodora*), γ -tocoferol (em *M. officinalis* e *M. piperita*) e de tocoferóis totais (em *M. officinalis*). Também foi possível detetar um elevado número de ácidos gordos nas espécies aromáticas estudadas. O ácido α -linolénico foi o ácido gordo maioritário em todas as espécies. Verificou-se, na maioria dos casos, uma interação positiva entre os fatores dose de irradiação e tempo de armazenamento. No caso particular das amostras não irradiadas de *A. citrodora* e *M. piperita*, estas apresentaram o maior aumento de ácidos gordos saturados e monoinsaturados (Tabela 4), assim como as amostras irradiadas de *M. officinalis* e *M. melissophyllum*.

Tabela 1. Composição nutricional (g/100 g massa seca), energia (kcal/100 g massa seca) e teor em açúcares (g/100 g massa seca) das amostras desidratadas de *M. procera* submetidas a diferentes doses de irradiação por feixe de elétrons (FE) e tempos de armazenamento (TA). Os resultados são apresentados como média \pm desvio padrão.

		Humidade	Lípidos	Proteínas	Glúcidos	Cinzas	Energia	Frutose	Manitol	Trealose	Melezitose	Açúcares totais
FE	0 kGy	90 \pm 1	2 \pm 1	29 \pm 6	63 \pm 8	6 \pm 1	388 \pm 2	0,05 \pm 0,05	5 \pm 2	9 \pm 3	0,2 \pm 0,2	14 \pm 6
	0.5 kGy	91 \pm 1	2 \pm 1	24 \pm 8	68 \pm 10	6 \pm 1	387 \pm 3	0,1 \pm 0,1	4 \pm 1	7 \pm 1	0,2 \pm 0,2	12 \pm 2
	1 kGy	91 \pm 1	2 \pm 1	28 \pm 8	64 \pm 10	6 \pm 1	385 \pm 2	0,05 \pm 0,05	5 \pm 2	11 \pm 4	0,3 \pm 0,3	16 \pm 6
	6 kGy	91 \pm 1	1,8 \pm 0,5	28 \pm 8	64 \pm 9	6 \pm 1	386 \pm 3	0,05 \pm 0,05	4 \pm 1	10 \pm 2	0,2 \pm 0,2	14 \pm 4
	p-valor (n=36)	0,068	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
TA	0 meses	91 \pm 1	2,8 \pm 0,4	36 \pm 1	54 \pm 1	7,7 \pm 0,4	383 \pm 1	0,15 \pm 0,05	7 \pm 1	13 \pm 3	0,7 \pm 0,1	20 \pm 4
	6 meses	na	2,0 \pm 0,2	28 \pm 4	64 \pm 4	5,2 \pm 0,3	389 \pm 1	nd	3,3 \pm 0,3	7 \pm 1	nd	11 \pm 1
	12 meses	na	1,1 \pm 0,1	18 \pm 1	76 \pm 1	4,7 \pm 0,3	387 \pm 1	nd	3,5 \pm 0,5	8 \pm 1	nd	11 \pm 2
	p-valor (n=27)	na	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FE \times TA	p-valor (n=108)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

na: não aplicável; nd: não detetado. Resultados publicados em Fernandes et al. (2014).

Tabela 2. Composição em tocoferóis (μ g/100 g massa seca) e ácidos gordos (AG,% relativa) das amostras secas de *M. procera* submetidas a diferentes doses de irradiação por feixe de elétrons (FE) e tempos de armazenamento (TA). Os resultados são apresentados como média \pm desvio padrão.

		α -Tocoferol	β -Tocoferol	γ -Tocoferol	δ -Tocoferol	Total tocoferóis	AG saturados	AG monoinsaturados	AG polinsaturados
FE	0 kGy	8 \pm 5	23 \pm 33	8 \pm 12	64 \pm 10	103 \pm 43	34 \pm 2	9,5 \pm 0,4	56 \pm 2
	0.5 kGy	6 \pm 2	9 \pm 13	9 \pm 12	75 \pm 9	99 \pm 18	30 \pm 5	10,8 \pm 0,2	59 \pm 6
	1 kGy	2 \pm 1	4 \pm 6	19 \pm 27	51 \pm 10	77 \pm 38	27 \pm 3	9,5 \pm 0,5	63 \pm 3
	6 kGy	3 \pm 1	15 \pm 22	15 \pm 22	46 \pm 20	80 \pm 64	29 \pm 1	10 \pm 1	60 \pm 1
	p-valor (n=36)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
TA	0 meses	4 \pm 1	39 \pm 21	38 \pm 14	64 \pm 7	145 \pm 22	28 \pm 5	10 \pm 1	62 \pm 5
	6 meses	7 \pm 5	nd	nd	56 \pm 20	63 \pm 21	31 \pm 3	10 \pm 1	59 \pm 4
	12 meses	3 \pm 1	nd	nd	58 \pm 21	61 \pm 22	32 \pm 2	10 \pm 1	58 \pm 2
	p-valor (n=27)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
FE \times TA	p-valor (n=108)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

nd: não detetado. Resultados publicados em Fernandes et al. (2014).

Tabela 3. Variação na composição nutricional, energia e açúcares (percentagem diferencial em relação aos valores do controlo: Pereira et al., 2015) das amostras secas das plantas aromáticas em função do feixe de eletrões (FE) a 10 kGy e do tempo de armazenamento (TA). Os resultados são apresentados como média \pm desvio padrão.

		Lípidos	Proteínas	Cinzas	Glúcidos	Energia	Frutose	Glucose	Sacarose	Trealose	Açúcares totais
A. citrodora	Controlo (0 meses, 0 kGy)	1,6 \pm 0,1	3,0 \pm 0,1	8,2 \pm 0,1	87,1 \pm 0,1	375 \pm 1	1,0 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	7,1 \pm 0,3	1,2 \pm 0,1	10,7 \pm 0,4
	0 kGy	-35 \pm 9	46 \pm 18	-21 \pm 3	3 \pm 1	2 \pm 1	-5 \pm 19	-37 \pm 16	-12 \pm 12	8 \pm 24	-14 \pm 13
	FE 10 kGy	-43 \pm 10	-1 \pm 11	-27 \pm 5	6 \pm 1	2 \pm 1	-13 \pm 14	-29 \pm 14	-41 \pm 18	-5 \pm 18	-22 \pm 12
	Valor-p (n=18)	0,017	<0,001	<0,001	<0,001	0,248	0,199	0,119	<0,001	0,072	0,062
	12 meses	-34 \pm 9	26 \pm 29	-21 \pm 3	4 \pm 1	2 \pm 1	-5 \pm 15	-26 \pm 14	-21 \pm 18	-1 \pm 19	-14 \pm 11
	TA 18 meses	-44 \pm 8	19 \pm 26	-27 \pm 5	5 \pm 2	2 \pm 1	-13 \pm 18	-40 \pm 14	-32 \pm 23	5 \pm 25	-22 \pm 14
	Valor-p (n=18)	0,001	0,495	<0,001	0,008	0,021	0,164	0,005	0,143	0,463	0,072
	FE \times TA Valor-p (n=36)	0,758	0,336	0,066	0,411	0,226	0,454	0,539	0,021	0,533	0,400
M. officinalis	Controlo (0 meses, 0 kGy)	1,2 \pm 0,1	2,5 \pm 0,3	8,4 \pm 0,4	88 \pm 1	372 \pm 2	1,2 \pm 0,1	1,0 \pm 0,1	4,8 \pm 0,2	0,49 \pm 0,05	7,5 \pm 0,2
	0 kGy	-12 \pm 11	2 \pm 8	-32 \pm 4	5 \pm 1	4 \pm 1	-9 \pm 13	-49 \pm 9	-100*	-53 \pm 8	-33 \pm 6
	FE 10 kGy	-8 \pm 8	4 \pm 6	-28 \pm 5	5 \pm 2	4 \pm 1	-9 \pm 16	-17 \pm 17	-100*	7 \pm 20	-9 \pm 14
	Valor-p (n=18)	0,300	0,349	0,670	0,773	0,534	0,986	<0,001	-	<0,001	<0,001
	12 meses	-8 \pm 12	6 \pm 6	-29 \pm 5	5 \pm 1	4 \pm 1	-11 \pm 16	-32 \pm 20	-100*	-27 \pm 29	-22 \pm 14
	TA 18 meses	-12 \pm 6	1 \pm 7	-30 \pm 4	5 \pm 1	4 \pm 1	-7 \pm 14	-34 \pm 23	-100*	-20 \pm 39	-19 \pm 18
	Valor-p (n=18)	0,203	0,018	0,212	0,953	0,122	0,429	0,768	-	0,543	0,588
	FE \times TA Valor-p (n=36)	0,118	0,011	0,001	0,850	0,003	0,487	0,423	-	0,046	0,179
M. melissophyllum	Controlo (0 meses, 0 kGy)	1,8 \pm 0,1	4,6 \pm 0,2	7,6 \pm 0,1	86,0 \pm 0,4	378 \pm 1	1,0 \pm 0,1	0,8 \pm 0,1	0,9 \pm 0,1	0,28 \pm 0,03	5,5 \pm 0,3
	0 kGy	3 \pm 16	1 \pm 10	-31 \pm 6	4 \pm 1	4 \pm 1	-20 \pm 8	-25 \pm 7	-6 \pm 9	504 \pm 218	11 \pm 10
	FE 10 kGy	-6 \pm 15	-2 \pm 8	-27 \pm 3	4 \pm 1	3 \pm 1	-4 \pm 12	-5 \pm 7	-9 \pm 6	783 \pm 327	26 \pm 8
	Valor-p (n=18)	0,121	0,532	0,046	0,135	0,058	<0,001	<0,001	0,326	0,005	<0,001
	12 meses	-2 \pm 15	1 \pm 8	-28 \pm 4	4 \pm 1	4 \pm 1	-11 \pm 12	-13 \pm 12	-5 \pm 7	748 \pm 339	25 \pm 9
	TA 18 meses	-2 \pm 17	-2 \pm 10	-30 \pm 6	4 \pm 1	4 \pm 1	-13 \pm 14	-17 \pm 13	-9 \pm 7	540 \pm 241	12 \pm 11
	Valor-p (n=18)	0,998	0,338	0,385	0,295	0,569	0,684	0,284	0,089	0,041	0,001
	FE \times TA Valor-p (n=36)	0,809	0,623	0,025	0,070	0,134	0,671	0,446	0,065	0,727	0,688
M. piperita	Controlo (0 meses, 0 kGy)	2,4 \pm 0,1	5,1 \pm 0,3	9,2 \pm 0,2	83,3 \pm 0,5	375 \pm 1	0,47 \pm 0,05	0,30 \pm 0,05	0,7 \pm 0,1	1,0 \pm 0,1	2,4 \pm 0,2
	0 kGy	-17 \pm 12	-3 \pm 14	-29 \pm 4	5 \pm 1	3 \pm 1	-13 \pm 14	-91 \pm 2	-45 \pm 28	-33 \pm 20	-75 \pm 4
	FE 10 kGy	-3 \pm 10	-7 \pm 4	-28 \pm 4	4 \pm 1	3 \pm 1	3 \pm 20	-88 \pm 3	4 \pm 62	15 \pm 50	-67 \pm 5
	Valor-p (n=18)	0,001	0,593	0,405	0,001	0,253	0,012	<0,001	0,005	0,001	<0,001
	12 meses	-2 \pm 9	-4 \pm 12	-29 \pm 3	4 \pm 1	4 \pm 1	-2 \pm 17	-87 \pm 2	-5 \pm 60	-1 \pm 49	-68 \pm 5
	TA 18 meses	-18 \pm 11	-4 \pm 1	-28 \pm 4	5 \pm 1	3 \pm 1	-7 \pm 21	-92 \pm 2	-36 \pm 42	-17 \pm 40	-74 \pm 6
	Valor-p (n=18)	<0,001	0,893	0,763	0,043	0,008	0,416	<0,001	0,079	0,299	0,002
	FE \times TA Valor-p (n=36)	0,476	0,269	0,003	0,005	0,030	0,640	0,070	0,841	0,618	0,953

* Parâmetro não detetado nas amostras tratadas nestas condições. Resultados publicados em Pereira et al. (2015).

Tabela 4. Variação nos teores de tocoferóis e ácidos gordos (AG) (percentagem diferencial em relação aos valores do controlo: Pereira et al., 2015) das amostras secas das plantas aromáticas em função do feixe de eletrões (FE) a 10 kGy e do tempo de armazenamento (TA). Os resultados são apresentados como média \pm desvio padrão.

		α -Tocoferol	β -Tocoferol	γ -Tocoferol	Tocoferóis totais	AG saturados	AG monoinsaturados	AG polinsaturados
A. citrodora	Controlo (0 meses, 0 kGy)	15,3 \pm 0,4	0,41 \pm 0,04	1,8 \pm 0,1	17,5 \pm 0,4	28,6 \pm 0,2	2,07 \pm 0,03	69,3 \pm 0,3
	0 kGy	-77 \pm 5	-31 \pm 14	-81 \pm 5	-77 \pm 5	67 \pm 19	143 \pm 42	-28 \pm 8
	FE 10 kGy	-74 \pm 7	-11 \pm 21	-78 \pm 7	-74 \pm 6	47 \pm 9	43 \pm 42	-16 \pm 5
	Valor- <i>p</i> (n=18)	0,148	0,003	0,236	0,113	0,001	<0,001	<0,001
	12 meses	-70 \pm 4	-21 \pm 16	-75 \pm 4	-70 \pm 3	44 \pm 6	54 \pm 54	-16 \pm 5
	TA 18 meses	-81 \pm 2	-21 \pm 24	-84 \pm 3	-81 \pm 2	70 \pm 16	132 \pm 53	-28 \pm 7
	Valor- <i>p</i> (n=18)	<0,001	0,990	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	FE \times TA Valor- <i>p</i> (n=36)	0,033	0,363	0,138	0,010	<0,001	0,568	<0,001
M. officinalis	Controlo (0 meses, 0 kGy)	29 \pm 1	1,3 \pm 0,1	1,5 \pm 0,1	32 \pm 1	41,2 \pm 0,5	6,2 \pm 0,2	52,6 \pm 0,5
	0 kGy	-75 \pm 2	-63 \pm 10	-43 \pm 14	-73 \pm 2	36 \pm 2	74 \pm 9	-35 \pm 2
	FE 10 kGy	-69 \pm 4	-52 \pm 22	-31 \pm 18	-66 \pm 5	47 \pm 6	114 \pm 60	-41 \pm 9
	Valor- <i>p</i> (n=18)	<0,001	0,054	0,037	<0,001	<0,001	0,013	0,009
	12 meses	-70 \pm 5	-45 \pm 16	-25 \pm 13	-67 \pm 5	40 \pm 3	68 \pm 14	-34 \pm 3
	TA 18 meses	-74 \pm 2	-70 \pm 7	-49 \pm 11	-73 \pm 3	44 \pm 9	120 \pm 54	-41 \pm 8
	Valor- <i>p</i> (n=18)	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	0,113	0,001	0,003
	FE \times TA Valor- <i>p</i> (n=36)	<0,001	0,002	0,437	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
M. melissophyllum	Controlo (0 meses, 0 kGy)	0,88 \pm 0,05	13,4 \pm 0,3	0,18 \pm 0,02	14,6 \pm 0,4	30,4 \pm 0,2	13,1 \pm 0,2	56,5 \pm 0,2
	0 kGy	-71 \pm 8	-100*	-9 \pm 11	-16 \pm 10	69 \pm 4	13 \pm 7	-25 \pm 2
	FE 10 kGy	-80 \pm 4	-100*	-20 \pm 5	-20 \pm 9	80 \pm 11	-6 \pm 3	-22 \pm 3
	Valor- <i>p</i> (n=18)	<0,001	-	0,220	0,223	0,001	<0,001	0,016
	12 meses	-72 \pm 8	-100*	-5 \pm 9	-12 \pm 8	78 \pm 13	1 \pm 7	-24 \pm 2
	TA 18 meses	-78 \pm 6	-100*	-17 \pm 7	-24 \pm 7	72 \pm 5	6 \pm 14	-23 \pm 4
	Valor- <i>p</i> (n=18)	0,018	-	<0,001	<0,001	0,053	0,157	0,414
	FE \times TA Valor- <i>p</i> (n=36)	0,131	-	0,234	0,653	<0,001	<0,001	<0,001
M. piperita	Controlo (0 meses, 0 kGy)	16,5 \pm 0,4	1,1 \pm 0,1	1,8 \pm 0,1	19,7 \pm 0,5	38 \pm 1	4,1 \pm 0,1	58 \pm 1
	0 kGy	-64 \pm 8	-100*	-63 \pm 11	-65 \pm 8	51 \pm 13	82 \pm 57	-25 \pm 8
	FE 10 kGy	-64 \pm 10	-100*	-52 \pm 13	-65 \pm 10	37 \pm 15	37 \pm 35	-19 \pm 9
	Valor- <i>p</i> (n=18)	0,915	-	0,011	0,828	0,004	0,008	0,066
	12 meses	-56 \pm 3	-100*	-48 \pm 9	-57 \pm 3	57 \pm 7	103 \pm 36	-31 \pm 3
	TA 18 meses	-73 \pm 2	-100*	-68 \pm 7	-73 \pm 2	31 \pm 9	16 \pm 15	-14 \pm 4
	Valor- <i>p</i> (n=18)	<0,001	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	FE \times TA Valor- <i>p</i> (n=36)	0,004	-	0,973	0,005	0,073	<0,001	0,099

* Parâmetro não detetado nas amostras tratadas nestas condições. Resultados publicados em Pereira et al. (2015).

3.3. Efeito na composição dos vegetais frescos

Os efeitos do tratamento de irradiação na composição nutricional, energia e teores de açúcares das amostras frescas de *N. officinale* e *R. induratus*, armazenadas a 4 °C durante 7 e 14 dias, respetivamente, são apresentados na Tabela 5. Os teores de água e glúcidos e a contribuição energética das amostras de *R. induratus* não foram significativamente afetados. O mesmo se verificou para o conteúdo em lípidos das amostras de *N. officinale*. Contudo, esta espécie apresentou um teor em glúcidos e proteínas mais baixo no final dos 7 dias de armazenamento; como consequência, o valor energético também diminuiu. No caso de *R. induratus*, o tratamento diminuiu o teor em lípidos. O teor em açúcares também foi afetado pelo tratamento de irradiação e tempo de armazenamento. Identificou-se frutose, glucose e sacarose em ambas as espécies. As amostras controlo não armazenadas revelaram os teores mais elevados de frutose e glucose e também de açúcares totais. A diminuição dos teores de frutose e glucose durante o armazenamento poderá dever-se à incapacidade do tratamento aplicado retardar a atividade metabólica dos vegetais, pois os açúcares redutores são os principais substratos no processo de respiração (Dey e Harborne, 1997). Também se verificou um aumento dos níveis de sacarose provavelmente devido a uma mobilização de reservas glucídicas.

A Tabela 6 apresenta o efeito do tratamento aplicado nos perfis de açúcares e ácidos gordos dos vegetais estudados. As amostras de *R. induratus* analisadas imediatamente após colheita apresentaram os teores mais elevados de α - e β -tocoferóis, os quais foram afetados negativamente pelo tratamento de irradiação. As isoformas γ - e δ - foram mais abundantes nas amostras armazenadas. O aumento do teor total de tocoferóis nas amostras controlo armazenadas poderá ter sido causado por condições de conservação indutoras de stresse, pois a síntese destes compostos é estimulada sob essas condições (Munné-Bosch, 2005), com o objetivo de proteger os tecidos contra as espécies reativas geradas durante o armazenamento. Contudo, é de salientar que estes antioxidantes lipofílicos poderão ter estado envolvidos na conservação de ácidos gordos polinsaturados. Teores elevados de tocoferóis foram também detetados em amostras armazenadas de *N. officinale*, sobretudo em amostras armazenadas não irradiadas e irradiadas a 5 kGy. O perfil em ácidos gordos também sofreu alterações significativas (Tabela 6). Os ácidos palmítico e α -linolénico foram os mais abundantes em ambas as espécies. Em geral, o tempo de armazenamento diminuiu a quantidade de ácidos gordos saturados e aumentou as quantidades de mono- e polinsaturados nas amostras de *N. officinale*. Em quase todos os casos (exceto amostras irradiadas a 1 kGy), foram obtidas amostras de agrião com um perfil de ácidos gordos mais saudáveis. Uma tendência contrária foi verificada para *R. induratus*, nomeadamente um aumento nos teores de ácidos gordos saturados.

4. Conclusões

A irradiação com feixe de eletrões não provocou alterações na maioria dos parâmetros nutricionais das amostras desidratadas de *M. procera*. No caso das plantas aromáticas, os compostos individuais (açúcares livres, tocoferóis e ácidos gordos polinsaturados) revelaram um decréscimo ao longo do tempo de armazenamento (12 e 18 meses); contudo, a aplicação do feixe de eletrões, apesar de não impedir completamente essa redução, teve uma ação significativamente atenuante. No entanto, não foi possível identificar tendências gerais, uma vez que os fatores testados tiveram efeitos dissimilares nas diferentes espécies. Este estudo evidenciou também a adequabilidade da radiação gama para conservar atributos nutricionais de vegetais durante o armazenamento refrigerado. Os resultados deste extenso trabalho de investigação são promissores, pois destacam os tratamentos pós-colheita com feixe de eletrões e radiação gama como sendo capazes de atenuar alterações indesejáveis causadas pela secagem e pelo tempo de armazenamento, permitindo alargar o tempo de vida útil de diferentes produtos alimentares.

Tabela 5. Efeito da irradiação na composição nutricional (g/100 g massa fresca), energia (kcal/100 g massa fresca) e teores de açúcares (mg/100 g massa fresca) das amostras frescas de *N. officinale* e *R. induratus* armazenadas a 4 °C durante 7 e 14 dias, respetivamente. Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão.

		Humidade	Cinzas	Proteínas	Lípidos	Glúcidos	Energia	Frutose	Glucose	Sacarose	Açúcares totais
<i>N. officinale</i>	Controlo (0 dias)	93±1 ^b	0,94±0,05 ^a	2,2±0,1 ^a	0,14±0,05	3,6±0,1 ^a	24,5±0,3 ^a	110±3 ^a	70±2 ^a	23±5 ^c	203±3 ^a
	0 kGy	94±1 ^a	0,88±0,05 ^{ab}	1,9±0,1 ^{bc}	0,13±0,02	3,0±0,1 ^b	20,8±0,5 ^{bc}	69±3 ^b	31±4 ^c	46±4 ^{ab}	145±4 ^b
	1 kGy	94±1 ^{ab}	0,87±0,03 ^{ab}	1,9±0,1 ^c	0,12±0,01	3,0±0,2 ^b	20,7±0,5 ^c	43±4 ^c	17±5 ^d	42±3 ^b	102±6 ^d
	2 kGy	94±1 ^{ab}	0,84±0,02 ^b	2,0±0,1 ^b	0,14±0,05	3,0±0,1 ^b	21,5±0,5 ^b	71±5 ^b	39±9 ^b	42±5 ^b	153±11 ^b
	5 kGy	94±1 ^{ab}	0,90±0,05 ^{ab}	2,0±0,1 ^{bc}	0,13±0,01	2,9±0,1 ^b	20,8±0,3 ^{bc}	42±2 ^c	39±4 ^b	50±5 ^a	132±5 ^c
	Valor-p	0,010	0,016	<0,001	0,261	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	7 dias 4 °C										
<i>R. induratus</i>	Controlo (0 dias)	91±1	0,91±0,02 ^b	2,9±0,1 ^{bc}	0,39±0,02 ^a	5,5±0,5	36±3	399±19 ^a	385±17 ^a	66±4 ^a	912±33 ^a
	0 kGy	90±1	1,00±0,05 ^a	3,3±0,1 ^a	0,35±0,02 ^b	5,3±0,5	36±2	165±7 ^c	127±7 ^b	24±2 ^c	332±15 ^b
	1 kGy	91±1	0,99±0,05 ^{ab}	3,0±0,1 ^b	0,29±0,04 ^c	5,0±0,5	33±3	176±8 ^c	113±6 ^c	24±4 ^c	328±12 ^b
	2 kGy	91±1	0,99±0,05 ^{ab}	3,0±0,1 ^{bc}	0,31±0,04 ^{bc}	4,9±0,5	33±3	191±7 ^b	124±7 ^{bc}	27±3 ^c	348±15 ^b
	6 kGy	91±1	0,98±0,05 ^{ab}	2,9±0,1 ^c	0,30±0,03 ^c	5,0±0,5	33±3	135±9 ^d	86±4 ^d	53±4 ^b	291±14 ^c
	Valor-p	0,103	0,015	<0,001	<0,001	0,403	0,054	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	14 dias 4 °C										

Para cada espécie, os valores com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente ($p<0.05$). Resultados publicados em Pinela et al. (2016a,b).

Tabela 6. Efeito da irradiação nos teores de tocoferóis (mg/100 g massa fresca) e ácidos gordos (AG, % relativa) das amostras frescas de *N. officinale* e *R. induratus* armazenadas a 4 °C durante 7 e 14 dias, respetivamente. Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão.

		α-Tocoferol	β-Tocoferol	γ-Tocoferol	δ-Tocoferol	Tocoferóis totais	AG saturados	AG monoinsaturados	AG polinsaturados
<i>N. officinale</i>	Controlo (0 dias)	0,50±0,03 ^c	0,011±0,001 ^b	0,038±0,003 ^c	nd	0,55±0,04 ^d	57±1 ^b	1,0±0,1 ^d	42±1 ^d
	0 kGy	1,25±0,05 ^a	0,021±0,004 ^a	0,067±0,005 ^b	nd	1,34±0,05 ^b	40±1 ^d	2,6±0,2 ^b	57±1 ^b
	1 kGy	0,96±0,05 ^b	0,011±0,002 ^b	0,070±0,003 ^b	nd	1,04±0,05 ^c	63±1 ^a	2,6±0,1 ^b	34±1 ^e
	2 kGy	0,26±0,01 ^d	0,005±0,001 ^c	0,041±0,001 ^c	nd	0,31±0,01 ^e	35±1 ^e	2,2±0,2 ^c	63±1 ^a
	5 kGy	1,21±0,05 ^a	0,012±0,001 ^b	0,22±0,01 ^a	nd	1,44±0,05 ^a	50±1 ^c	4,8±0,4 ^a	45±1 ^c
	Valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	nd	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	7 dias 4 °C								
<i>R. induratus</i>	Controlo (0 dias)	3,8±0,2 ^a	0,10±0,02 ^a	1,6±0,1 ^c	0,33±0,04 ^e	5,8±0,3 ^b	40,6±0,4 ^e	3,4±0,2 ^a	56,0±0,4 ^a
	0 kGy	2,8±0,1 ^b	0,06±0,01 ^b	3,2±0,2 ^a	1,6±0,1 ^b	7,7±0,3 ^a	48,4±0,5 ^b	3,0±0,2 ^b	48,5±0,4 ^c
	1 kGy	1,3±0,1 ^c	0,03±0,01 ^d	1,7±0,1 ^b	1,5±0,1 ^c	4,5±0,2 ^c	70,0±0,5 ^a	3,4±0,1 ^a	27,7±0,5 ^d
	2 kGy	1,1±0,1 ^d	0,04±0,01 ^c	1,5±0,1 ^c	1,8±0,1 ^a	4,5±0,2 ^c	45,0±0,5 ^c	2,7±0,3 ^c	52,3±0,5 ^b
	6 kGy	0,9±0,1 ^e	0,03±0,01 ^d	1,2±0,1 ^d	1,1±0,1 ^d	3,2±0,1 ^d	41,4±0,5 ^d	2,0±0,2 ^d	56,6±0,5 ^a
	Valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	14 dias 4 °C								

Para cada espécie, valores com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente ($p<0.05$). nd: não detetado. Resultados publicados em Pinela et al. (2016a,b).

Agradecimentos

Ao PRODER - Projeto AROMAP, pelo apoio financeiro ao trabalho. À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, Portugal) e ao FEDER no âmbito do programa PT2020 pelo apoio financeiro ao CIMO (UID/AGR/00690/2013), ao REQUIMTE (UID/QUI/50006/2013 - POCI/01/0145/FERDER/007265) e ao C2TN (RECI/AAG-TEC/0400/2012; UID/Multi/04349/2013). À FCT pelas bolsas atribuídas a J. Pinela (SFRH/BD/92994/2013), F. Reis (SFRH/BD/111753/2015) e Â. Fernandes (SFRH/BPD/114753/2016).

Bibliografia

- Almeida, A.P.G. 2006. Avaliação da influência do processo de irradiação em especiarias utilizando a técnica de difração de raios-X. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- AOAC, 2016. *AOAC Official Methods of Analysis*, 20th Editi. ed. AOAC International.
- Celestino, S.M.C. 2010. *Princípios de Secagem de Alimentos*. Embrapa Cerrados: Planaltina.
- Dey, P.M. and J.B. Harborne. 1997. *Plant biochemistry*. London, UK: Academic Press.
- Directiva 1999/3/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de Fevereiro de 1999 relativa ao estabelecimento de uma lista comunitária de alimentos e ingredientes alimentares tratados por radiação ionizante. Jornal Oficial nº L 066 de 13/03/1999 p. 0024 - 0025
- Fernandes, Â., J.C.M. Barreira, A.L. Antonio, et al. 2014. Combined effects of electron-beam irradiation and storage time on the chemical and antioxidant parameters of wild *Macrolepiota procera* dried samples. *Food and Bioprocess Technology*. 7:1606-1617.
- Haleem, R.M., M.Y. Salem, F.A. Fatahallah and L.E. Abdelfattah. 2015. Quality in the pharmaceutical industry - A literature review. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 23: 463-469.
- Ibrahim, M.A., A. Mohammed, M.B. Isah and A.B. Aliyu. 2014. Anti-trypanosomal activity of African medicinal plants: A review update. *Journal of Ethnopharmacology*. 154:26-54.
- ICGFI. 1999. Facts about Food Irradiation: A series of Fact Sheets from the International Consultative Group on Food Irradiation. Vienna, Austria.
- Lacroix, M. and B. Ouattara. 2000. Combined industrial processes with irradiation to assure innocuity and preservation of food products - a review. *Food Research International*. 33: 719-724.
- Munné-Bosch, S. 2005. The role of α -tocopherol in plant stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 162:743-748.
- Pereira, E., A.L. Antonio, A. Rafalski, et al. 2015. Extending the use of irradiation to preserve chemical and bioactive properties of medicinal and aromatic plants: A case study with four species submitted to electron beam. *Industrial Crops and Products*. 77:972-982.
- Pinela, J. and I.C.F.R. Ferreira. 2017. Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 57:2095-2111.
- Pinela, P., J.C.M. Barreira, L. Barros, et al. 2016a. Modified atmosphere packaging and post-packaging irradiation of *Rumex induratus* leaves: a comparative study of postharvest quality changes. *Journal of Food Science and Technology*. 53:2943-2956.
- Pinela, P., J.C.M. Barreira, L. Barros, et al. 2016b. Suitability of gamma irradiation for preserving fresh-cut watercress quality during cold storage. *Food Chemistry*. 206:50-58.
- Walde S.G., V. Velu, T. Jyothirmayi and R.G. Math. 2006. Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. *Journal of Food Engineering*, 74: 108-115.